**Journal of Water and Soil**
https://jsw.um.ac.ir



**Research Article**
**Vol. 37, No. 2, May-June 2023, p. 187-202**

# Determining the Optimal Cropping Pattern Based on the Multiple Objectives of Water, Energy, Food and Economic Profit Indices (Case Study: Markazi Province - Farahan Plain)

**M. Goodarzi[1]*, J. Ghadbeiklou[2], A. Ghadiri[3], M.A. Khodshenas[4]**

| Received: 06-12-2022<br>Revised: 10-01-2023<br>Accepted: 17-01-2023<br>Available Online: 17-01-2023 | **How to cite this article:**<br>Goodarzi, M., Ghadbeiklou, J., Ghadiri, A., & Khodshenas, M.A. (2023). Determining the optimal cropping pattern based on the multiple objectives of water, energy, food and economic profit indices (Case study: Markazi province- Farahan plain). *Journal of Water and Soil, 37*(2), 187-202. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79946.1233 |
|---|---|

## Introduction

Water is one of the most important factors of development in human societies, water scarcity, specially fresh water which is one of the main limitation for agricultural, economic and social development in most developing countries. Providing and implementing an optimal cropping pattern, in addition to better management of water and soil resources, can lead to reducing production risk, increasing the ability to deal with crises, improving employment, better management of providing services to farmers, and providing the possibility of expanding agro-based industries. In many regions of the world, including in Iran, many studies have been done to improve the cropping pattern in different regions. Despite the existing problems in designing and implementing the appropriate cropping pattern in the plains, modifying the cropping pattern based on scientific principles and emphasizing the reduction of water consumption while reducing water consumption provides the possibility of sustainable agriculture and in terms of economic and social aspects. Implementing an optimized cropping pattern in the Farahan Plain is an undeniable necessity to preserve national resources. This study was conducted with the objective of optimizing the cropping pattern in the area, taking into account multiple criteria.

## Methodology

In this research, considering the importance of determining the cropping pattern based on the multiple objectives of the decision makers, it was tried to determine the optimal cropping pattern by using mathematical programming and fuzzy logic by establishing a compromise between the objectives of the cropping pattern. The model considered for this study was in the framework of the goal of the maximum ideal distance (Fuzzy Composite Distance). Also, in order to use water resources sustainably, scenarios of cropping patterns are presented based on different conditions of water resources uses. Based on the basin's water resource stability, an optimal cropping pattern was developed to address the conditions of normal water resource exploitation, as well as sustainable and unsustainable scenarios. Each scenario corresponds to a specific period. To achieve this, a multi-objective planning approach was utilized, integrating water, food, energy, and economic profit indicators. The resulting optimal cropping pattern considers stable water resource utilization during normal, drought, and wet periods, ensuring sustainable conditions.

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.godarzi@areeo.ac.ir)
2 and 4- Scientific Member, Soil and Water Department, Markazi Agricultural and Resources Research and Training Center, AREEO, Arak, Iran
3- Researcher, Seed and Plant Improvement Research Department, Markazi Agricultural and Resources Research and Training Center, AREEO, Arak, Iran
DOI: 10.22067/jsw.2023.79946.1233

## Results and Discussion

The results showed that the amount of water consumed by the optimal cropping pattern compared to the existing cropping pattern under normal, drought and wet conditions is reduced by 23.2, 29.2 and 18.1%, respectively. On the other hand, compared to the existing cropping pattern, the amount of calories produced by the optimal cropping pattern under normal, drought and wet conditions increases by 51.7, 61.9 and 45.2%, the average energy efficiency increases by 40.9, 42.8 and 35.8% and the net profit productivity increases by 43.3, 30.9 and 44.2 %, respectively. Based on the obtained results, it can be seen that in the optimal cropping pattern in drought conditions, the cultivated area of crops such as potatoes, onions, tomatoes, grain corn, sugar beets, beans, alfalfa and watermelons should reach to the zero or be at the lowest possible level. In normal and drought conditions, the cultivated area of these crops should be minimal. On the other hand, the area under cultivation of crops such as fodder sorghum, fodder corn, saffron, cumin, camellia and medicinal plants should be increased and the cultivation of these crops should be promoted at the region. Also, regarding horticultural products, the cultivated area of walnut, apple, peach, apricot and almond orchards should be minimized and replaced with plants such as grapes, oleaster, jujube, barberry, rose, and figs.

## Conclusion

Based on the obtained results, it was found that the use of the optimal cropping pattern derived from the indicators of water, food, energy and economic profit is completely superior and preferred over the existing cropping pattern and single purpose optimal cropping pattern. In order to achieve sustainable water resource management, it is recommended to modify the cropping pattern during drought, normal, and wet periods based on the suggested optimal cropping pattern. The existing cropping pattern currently falls short in terms of achieving the four objectives of water, food, energy, and economic profit. Therefore, it is crucial to develop main plans and strategies in the Farahan Plain that align with the implementation of the proposed optimal cropping pattern. By doing so, it will be possible to optimize the allocation of water resources and achieve improved outcomes in terms of water availability, food production, energy efficiency, and economic profitability.

**Keywords:** Cropping pattern, Food, Optimization, Productivity, Water

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۰۲-۱۸۷

# تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم‌بست آب، انرژی، غذا و سود اقتصادی (مطالعه موردی استان مرکزی- دشت فراهان)

مصطفی گودرزی[1*]- جواد قدبیک لو[2]- عادل غدیری[3]- محمدعلی خودشناس[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

## چکیده

ارائه و اجرای یک الگوی کشت بهینه علاوه بر مدیریت بهتر منابع پایه آب و خاک، امکان کشاورزی پایدار را فراهم نموده و از لحاظ جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی یک ضرورت انکارناپذیر است. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی چند هدفه، برای پیوند شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی در دشت فراهان و در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. الگوی کشت بهینه برای شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به گونه‌ای ارائه شد که بهره‌برداری از منابع آب در شرایط پایدار صورت پذیرد. نتایج حاصل نشان داد، مقدار آب مصرفی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۲۳، ۲۹ و ۱۸ درصد نسبت به الگوی کشت موجود کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار کالری تولیدی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۵۲، ۶۲ و ۴۵ درصد، متوسط بهره‌وری انرژی ۴۱، ۴۳و ۳۶ درصد و سود خالص تولیدی ۴۳، ۳۱ و ۴۴ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب بایستی الگوی کشت در دوره‌های خشکسالی، نرمال و ترسالی مطابق الگوی بهینه پیشنهادی تغییر یابد. بنابراین، با توجه به اینکه الگوی کشت موجود کمترین انطباق را برای رسیدن به اهداف چهارگانه کاهش مصرف آب، افزایش تولید غذا، کاهش مصرف انرژی و افزایش سود اقتصادی دارد، برنامه‌ریزی‌های کلان در این دشت بایستی در راستای اجرای الگوی کشت بهینه پیشنهادی تدوین گردد.

**واژه‌های کلیدی:** آب، الگوی کشت، بهره‌وری، بهینه‌سازی، غذا

## مقدمه

آب یکی از مهمترین عوامل رشد و توسعه در جوامع بشری است، کمبود آب به ویژه آب باکیفیت یکی از علل عدم توسعه کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی در اکثر کشورهای در حال توسعه است. در اقتصاد مبتنی بر کشاورزی لزوم برنامه‌ریزی همه جانبه به منظور استفاده از منابع تولید برای دست یافتن به بیشترین بازده اقتصادی امری ضروری است. هدف اصلی در هر نوع کشاورزی باید به سمت بالا بردن بهره‌وری سوق یابد تا بتواند کمبودهای ناشی از افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی را جبران نماید (Mohammadian *et al.*, 2008). با توجه به نامناسب بودن پراکندگی زمانی و مکانی ریزش‌های جوی در ایران و پایین بودن راندمان آبیاری در کشاورزی، آب به عنوان محدودکننده‌ترین عامل تولید در بخش کشاورزی می‌باشد. به علت گستردگی پهنه مرزی کشورمان و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون، رسیدن به الگوی کشت مناسب که از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید به ویژه عامل محدودکننده آب بدست آورد، ضرورتی انکارناپذیر است (Hasan Panah *et al.*, 2014). با افزایش روزافزون جمعیت و

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.godarzi@areeo.ac.ir)
۲ و ۴- مربیان پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک،
۳- محقق، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران
DOI: 10.22067/jsw.2023.79946.1233

به‌تناسب افزایش نیاز به مواد غذایی و با توجه به محدودیت منابع آبی و زمین‌های مستعد جهت افزایش تولید و همچنین کمبود منابع آبی و وقوع پدیده تغییر اقلیم، تغییر در سیستم فعلی و یا بهبود الگوی کشت جهت بالا بردن و استفاده از منابع آب امری ضروری است.

ارائه و اجرای یک الگوی کشت بهینه علاوه بر مدیریت بهتر منابع پایه آب و خاک می‌تواند منجر به کاهش ریسک تولید، افزایش قابلیت مقابله با بحران‌ها، ایجاد اشتغال، مدیریت بهتر ارائه خدمات به بهره‌برداران و فراهم شدن امکان گسترش صنایع مرتبط با تولیدات کشاورزی گردد. در بسیاری از مناطق دنیا از جمله در ایران جهت بهبود الگوی کشت در مناطق مختلف تحقیقات و مطالعات زیادی انجام شده است. زنگ و همکاران (Zeng *et al.*, 2010) به منظور مدیریت منابع آب کشاورزی لیانگ ژو، در استان گانسو چین، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی چند هدفه به تعیین الگوی کشت بهینه در منطقه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که راه حل ارائه شده توسط برنامه‌ریزی خطی فازی چند هدفه در مقایسه با برنامه‌ریزی خطی چند هدفه می‌تواند نتایج بهتری را در برنامه‌ریزی و راه حل‌های بهینه به مدیران جهت تصمیم‌گیری ارائه دهد.

رگولوار و گواراو (Regulwar and Gurav, 2013) در مطالعه‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی چند هدفه در ۵ منطقه مختلف از دهلی که در شرایط آب و هوایی متفاوت و در فصل‌های مختلفی از سال واقع بودند، اهداف مختلفی چون سود خالص تولید محصول، اشتغال و بهره‌برداری از کودهای آلی را حداکثر و الگوی بهینه کشت را برای این اهداف همراه با یک برنامه‌ریزی پایدار برای آبیاری با توجه به مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ارائه دادند.

پورسامانی (Poursamani, 2018) در مطالعه‌ای به تعیین الگوی کشت محصولات زراعی با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی ترتیبی و تأکید کارآیی اقتصادی مصرف آب و کشاورزی پایدار در دشت تربت جام پرداخته است. در این مطالعه تدوین الگوی کشت متناسب با ظرفیت‌ها و قابلیت‌های منابع تولیدی دشت‌های زراعی گام ضروری در جهت نیل به توسعه پایدار بخش کشاورزی معرفی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی باعث کاهش مصرف مقادیر نهاده‌های تولید می‌شود. همچنین محصولات چغندرقند و پنبه در منطقه مورد مطالعه فاقد توجیه اقتصادی بوده و لذا در الگوی کشت مورد بررسی کنار گذاشته می‌شوند.

الگفی و همکاران (El Gafy *et al.*, 2017) در تحقیقی که در کشور مصر روی ۱۹ محصول انجام دادند، الگوی کشت بهینه از منظر کاهش مصرف آب و انرژی و افزایش سود خالص در سناریوهای بدون پیوند و همراه با پیوند را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور، از سناریوهای مختلفی نظیر حداکثر سازی شاخص پیوند آب، انرژی و غذا، حداقل سازی مصرف آب، حداقل سازی مصرف انرژی و بهینه‌سازی سود خالص استفاده نمودند. نتایج نشان داد الگوی کشت همراه با پیوند آب، انرژی و غذا نتایج مطلوب‌تری به همراه دارد.

عوض‌یار و همکاران (Avazyar *et al.*, 2018)، در تحقیقی بهینه‌سازی الگوی کشت جهت افزایش بازده آبیاری در اراضی پایاب ملاصدرا در استان فارس را مورد ارزیابی قرار دادند. به این منظور، از روش‌های برنامه‌ریزی خطی قطعی (DLP)، برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های تصادفی (CCLP)، جهت ارائه‌ی یک الگوی بهینه کشت توأم با عدم قطعیت استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی الگوی کشت سود ناخالص سالانه زارعین در منطقه به میزان ۵۴ درصد افزایش یافته و سالانه بیش از ۱ میلیون مترمکعب نیز در مصرف آبهای زیرزمینی صرفه‌جویی خواهد شد.

مفتاح هلقی و همکاران (Meftah Halaghi *et al.*, 2020)، در تحقیقی بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی را در حوضه آبریز قره‌سو مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش ضمن مقایسه دو روش برنامه‌ریزی خطی معمولی و برنامه‌ریزی آرمانی، الگوی کشت بهینه و میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌سو را تعیین نمودند. نتایج نشان داد که الگوی کشت بهینه پیشنهادی حاصل از مدل برنامه‌ریزی خطی متعارف باعث کاهش مصرف آب در دو شهرستان گرگان و کردکوی به ترتیب به میزان ۱۹/۶ و ۸/۸ درصد شده و در عین حال سود حاصل از تولید محصولات کشاورزی در شهرستان‌های گرگان و کردکوی به ترتیب ۱۲/۶ و ۱۰/۴ درصد افزایش می‌یابد. در صورتیکه مدل برنامه‌ریزی آرمانی الگوی کشت بهینه را با افزایش ۵ درصد سود در هر دو شهرستان، همراه با کاهش ۴۶ و ۴۷ درصد مصرف آب به ترتیب در دو شهرستان گرگان و کرکوی ارائه می‌دهد.

پناهی و فلسفیان (Panahi and Falsafian, 2021)، در تحقیقی به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت شبستر با توجه به محدودیت آب پرداختند. برای این منظور از الگوهای برنامه‌ریزی خطی و آرمانی تحت سناریوهای مختلف حداکثرسازی سود و حداقل سازی مصرف آب بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که اجرای الگوی بهینه کشت با هدف حداکثرسازی سود باعث گردید که میزان سود کشاورز و مصرف آب به ترتیب ۳۸۲/۲ و ۴۴/۳ درصد افزایش و تحت هدف حداقل سازی مصرف آب، میزان سود کشاورز و مصرف آب به ترتیب ۹۰/۶ و ۲۲/۸۷ درصد کاهش یابد. اما در اجرای الگوی بهینه کشت با هدف دستیابی هم‌زمان به حداکثر سود و حداقل مصرف آب، ملاحظه شد که میزان سود ۱/۱ درصد افزایش و میزان مصرف آب ۴/۷۱ درصد کاهش می‌یابد.

عارفی‌نیا و احمدآلی (Arefinia and Ahmadaali, 2021)، در تحقیقی بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت را در استان‌های شرق کشور بر اساس ردپای آب انجام دادند. در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی با اهداف

حداکثر کردن ارزش اقتصادی ردپای آب و حداقل کردن ردپای آب آبی در قالب چهار سناریو استفاده شد. نتایج نشان داد در صورت اجرای الگوی کشت بهینه چنانچه منطقه موردمطالعه از منظر قید امنیت آبی به ترتیب در شرایط بحران متعادل، متوسط و شدید قرار داشته باشد، میزان تولید به ترتیب ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد میزان فعلی و به‌طور میانگین باعث صرفه‌جویی به ترتیب ۵۵، ۴۰ و ۳۰ درصدی منابع آبی منطقه می‌شود.

هوشمند و همکاران (Hooshmand *et al.*, 2021)، در تحقیقی چهار مدل هیبریدی بر مبنای بیشینه‌سازی نرخ بازدهی اقتصادی و کمینه‌سازی ریسک انتخاب الگوی کشت بهینه را مورد ارزیابی قرار دادند. مدل‌ها بر اساس برنامه‌ریزی غیرخطی و حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و به‌صورت چندهدفه انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در تمام مدل‌ها بیانگر افزایش بازدهی اقتصادی با افزایش سطح ریسک‌پذیری سیستم در انتخاب الگوی کشت‌های بهینه بود.

سیاسر و سالاری (Siasar and Salari, 2021)، در تحقیقی از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه آشوبناک در تعیین الگوی کشت بهینه دشت سیستان در شرایط بهینه و کم‌آبیاری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که الگوی کشت فعلی منطقه بهینه نبوده و با اجرای الگوی پیشنهادی مدل، سود حاصل به‌ازای واحد سطح زیر کشت، افزایش خواهد یافت. همچنین، با کاهش ۲۵ درصدی آب مصرفی شبکه، مقدار بازده برنامه‌ای ۱۴/۵ درصد و با کاهش ۵۰ درصدی آب مصرفی، مقدار بازده برنامه‌ای ۴۱/۵ درصد کاهش می‌یابد.

صالحی شفا (Salehi Shafa, *et al.*, 2022)، در تحقیقی به بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با دو تابع هدف سود خالص و مصرف آب کشاورزی به صورت مجزا برای دشت شهریار تهران پرداختند. نتایج نشان داد با توجه به مساحت کشت و حجم آب مصرفی بهینه محصولات انگور، انار، پیاز، سبزیجات و گلابی در هر ناحیه، سود خالص آن‌ها مناسب و ایده‌آل است و انگور بهترین محصول ممکن در میان آن‌ها می‌باشد. سیاست بهره‌برداری بهینه از منابع آبی منجر به کاهش سطح زیر کشت، حجم آب مصرفی بهینه و حجم نیاز آبی در کل محدوده مورد مطالعه نسبت به حالت فعلی به اندازه ۲۰/۴۴، ۴۹/۷۱ و ۳۵/۲ درصد می‌شود.

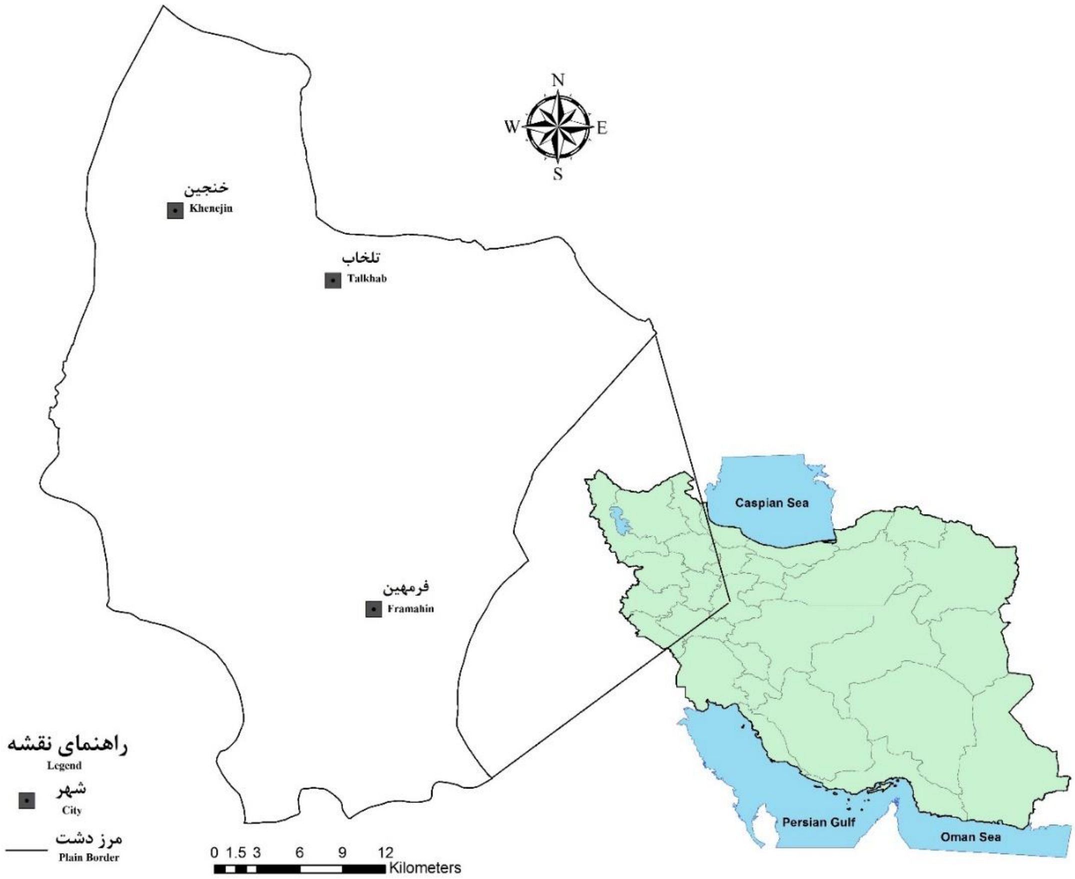
گودرزی (Goodarzi, 2022)، در تحقیقی به رتبه‌بندی محصولات قابل کشت در دشت فراهان با استفاده از معیارهای چندگانه و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) پرداخت. بدین منظور با استفاده از روش AHPمحصولات قابل کشت بر اساس چهار شاخص آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی و نیز ترکیب این چهار شاخص رتبه‌بندی شدند. نتایج بدست آمده نشان داد بر اساس معیار آب مصرفی به ترتیب سه محصول زعفران، زیره و کاملینا، بر اساس معیار کالری تولیدی به ترتیب سه محصول سورگوم علوفه‌ای، سیب‌زمینی و ذرت علوفه‌ای، بر اساس انرژی مصرفی به ترتیب سه محصول سورگوم علوفه‌ای، ذرت علوفه‌ای و انگور و بر اساس سود اقتصادی اسطوخودوس، آویشن و گل‌گاوزبان اولویت اول کشت در سطح منطقه می‌باشند.

علیرغم مشکلات موجود در راستای طراحی و اجرای الگوی کشت مناسب در سطح دشت‌ها، اصلاح الگوی کشت بر اساس اصول علمی و با تأکید بر کاهش مصرف آب ضمن کاهش مصرف آب امکان کشاورزی پایدار را فراهم نموده و از لحاظ جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی یک ضرورت انکارناپذیر است و بایستی در راستای حفظ منابع ملی نسبت به اجرای آن اقدام نمود. لذا، با توجه به ضرورت حفاظت از منابع آب و مصرف صحیح آن در بخش کشاورزی که عمده‌ترین مصرف کننده آب محسوب می‌گردد و رسیدن به کشاورزی پایدار، این تحقیق با هدف بهینه‌سازی الگوی کشت در دشت فراهان با در نظر گرفتن معیارهای چندگانه اجرا گردید.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دشت فراهان واقع در استان مرکزی دارای چهار دهستان (فرمهین، فشک، خنجین و تلخاب) و ۶۸ پارچه آبادی و دارای دو شهر فرمهین و خنجین است. دشت فراهان از طرف شمال و شرق به شهرستان تفرش و آشتیان، از جنوب به شهرستان اراک و از غرب به شهرستان کمیجان محدود می‌شود. مساحت این دشت حدود ۱۴۹۹ کیلومترمربع است که ۵۶۷۳۰ هکتار اراضی منابع طبیعی و ۹۳۱۷۰ هکتار اراضی مستثنیات (۴۱۰۰۰ هکتار اراضی دیم، ۲۷۰۰۰ هکتار آیش دیم، ۱۴۱۷۰ هکتار اراضی زیر کشت آبی، ۸۰۰۰ هکتار آیش آبی، ۲۵۰۰ هکتار باغات آبی و ۵۰۰ هکتار باغ دیم) است. دشت فراهان با مختصات جغرافیایی ″۱۹′۳۵°۴۹ درجه و ″۲۷′۴۷°۴۹ تا طول شرقی و ″۲۴′۳۳°۰۸ تا ″۱۹′۲۴°۳۴ عرض شمالی، بخش نسبتاً وسیعی از حوضه آبخیز کویر میقان را به خود اختصاص داده است. شیب متوسط منطقه حدود ۱۰/۷ درصد و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۷۵۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه و متوسط دمای سالانه منطقه مورد مطالعه به ترتیب معادل ۲۷۰ میلی‌متر و ۱۳/۲ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین، سطح وسیعی از منطقه دارای بافت خاک لومی رسی و لومی رسی سیلتی است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.




**شکل ۱- موقعیت دشت فراهان در استان و کشور**

**Figure 1- Location of the Farahan plain in the province and country level**

در این تحقیق، به منظور تعیین الگوی کشت مناسب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از هم‌بست[1] شاخص‌های انرژی، غذا، سود اقتصادی و آب مصرفی استفاده گردید و میزان مساحت تحت کشت هر محصول مشخص شد. با توجه به اهمیت شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی در سطح منطقه مورد مطالعه و به طور کلی شرایط کشور ایران، از این اهداف به عنوان اهداف چندگانه برای بهینه‌سازی استفاده شد. بدین منظور از رویکرد برنامه‌ریزی چند هدفه، برای هم‌بست شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی استفاده گردید. با توجه به اینکه این اهداف نامتجانس هستند، لذا لازم است تا به گونه‌ای متجانس گردند. در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌هایی که معیارهای تصمیم‌گیری از مقیاس‌های نامتجانسی برخوردارند می‌توان از منطق فازی برای همجنس کردن آنها استفاده نمود. در این تحقیق با توجه به اهمیت تعیین الگوی کشت بر اساس اهداف چندگانه تصمیم گیرندگان، سعی شد که با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و منطق فازی با برقراری مصالحه بین اهداف الگوی کشت بهینه تعیین گردد. الگوی در نظر گرفته شده برای این تحقیق در چارچوب هدف حداکثر مسافت آرمانی است، که فرم عمومی آن به صورت زیر می‌باشد (Mohammadi *et al.*, 2012؛ Nikoi 2014؛ Jones and Barnes 2000):

$$\text{Max: } \lambda=\left[\sum_{j=1}^{m} W_j \lambda_j^P\right]^{\frac{1}{P}} \quad (۱)$$

Subjected to:

$$\lambda_j\left(Z_j^{Max}-Z_j^{Min}\right)+Z(X^*)\le Z_j^{Max} \quad (۲)$$

When $Z_j^{Max}$ is best

$$Z(X^*)-\lambda_j\left(Z_j^{Max}-Z_j^{Min}\right)\ge Z_j^{Min} \quad (۳)$$

When $Z_j^{Min}$ is best

$$A_{hi}X_i\le b_h \quad (۴)$$

1 - Nexus

$X_i \geq 0$ (۵)

$0 \leq \lambda \leq 1$

$I=1, 2,, \ldots, n \quad j=1, 2, \ldots, 4 \quad h= 1, 2, \ldots, q$ (۶)

که در این روابط $X_i$ سطح زیر کشت محصول iام و $\lambda_j$ مسافت تا حد آرمانی هدف jام عبارت از متغیرهای تصمیم الگو هستند که باید مقادیر بهینه آنها پس از حل آن به دست آیند. رابطه ۱ تابع هدف الگو است که در آن $\lambda$ جمع مرکب آرمانی اهداف مورد نظر در مطالعه است که هدف حداکثر کردن آن است. در این رابطه $w_j$ وزن هدف j و P عامل تعادلی اهداف است. این عامل به نوعی درجه جانشینی[1] بین اهداف را مشخص می‌کند. P برابر ۱ به معنی بیشترین درجه جانشینی و P برابر با ۳ به معنی کمترین درجه جانشینی بین اهداف است. روش کار در تعیین وزن اهداف به این صورت بود که از روش تحلیل سلسله مراتبی (Goodarzi 2022; Saaty 1980)، استفاده شد و برتری یک هدف بر هدف دیگر به صورت کمی مشخص شد که این کمیت همان وزن اهداف می‌باشد. روابط ۴ و ۵ تابع عضویت اهداف یاد شده در الگوی مطالعه را مشخص می‌کنند. در این روابط $Z_j^{min}$ و $Z_j^{max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر هدف j ام، $Z_j\ (X^*)$ مقدار بهینه هدف و $X^*$ جواب بهینه است و اختلاف $Z_j^{min}$ و $Z_j^{max}$ را با عنوان حد تحمل تعریف می‌کنند. رابطه ۴ برای اهدافی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقدار آرمانی آنها حداقل شدن متغیر هدف مربوطه (آب و انرژی) است در حالی که رابطه ۵ برای عضویت اهداف آرمانی حداکثر شدن (کالری و سود اقتصادی) در نظر گرفته می‌شود. مجموع روابط ۳ تا ۵ مشروط بر محدودیت‌های فنی در قالب رابطه ۶ در نظر گرفته می‌شوند. در این رابطه، $A_{hi}$ ضریب فنی[2] iامین محصول برای hامین محدودیت (منابع تولید) و $b_h$، موجودی hامین محدودیت (منابع تولید) در الگو است. برای تشکیل توابع عضویت چهار هدف بیان شده یعنی حداقل مصرف آب، حداکثر تولید غذا، حداقل مصرف انرژی و حداکثر سود اقتصادی، ابتدا باید مقادیر بهینه برای هر یک از اهداف را مطابق روابط زیر تعیین نمود.

$$\text{Minimize: } W= \sum CWR_i X_i \text{ for } i=1,2,3,\ldots,N \quad (۷)$$

$$\text{Maximize: } NB= \sum_{i=1}^{n} [Y_i P_{ci} - C_i] X_i \quad (۸)$$

$$\text{Minimize: } E= \sum E_i X_i \text{ for } i=1,2,3,\ldots,N \quad (۹)$$

$$\text{Maximize: } Cal= \sum Cal_i Y_i X_i \text{ for } i=1,2,3,\ldots,N \quad (۱۰)$$

که در این روابط W کل آب مصرفی توسط تمامی گیاهان ($m^3$)، N تعداد گیاهان، $CWR_i$ آب مصرفی توسط گیاه iام (m) و $X_i$ مساحت اختصاص یافته به گیاه iام ($m^2$)، $Y_i$ عملکرد گیاه i (Ton/ha)، NB سود خالص (Toman/ton)، $P_{ci}$ قیمت گیاه i (Toman/ton) ، $C_i$ هزینه تولید گیاه i (Toman/ha)، که شامل هزینه‌های پمپاژ نیز می‌باشد، $E_i$ کارایی انرژی برای تولید در هر هکتار محصول iام، E انرژی کل مصرفی برای تولید، $Cal_i$ مقدار کالری تولیدی هر تن از گیاه iام و Cal کل کالری غذایی تولید شده توسط محصولات الگوی کشت می‌باشند.

در این پژوهش، اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، عملکرد محصول، هزینه‌های تولید (شامل هزینه آماده‌سازی زمین، هزینه نهاده‌ها، هزینه نیروی انسانی و هزینه‌های مربوط به برداشت محصول) و قیمت فروش محصولات، از داده‌ها و اطلاعات پایگاه داده‌های سازمان جهاد کشاورزی استان مرکزی و مرکز آمار ایران (آمارنامه کشاورزی ۱۳۹۹) و اطلاعات هواشناسی از اداره هواشناسی استان مرکزی اخذ شد. برای محاسبه شاخص اقتصادی از معادلات زیر استفاده گردید.

$$GB= Y \times P \quad (۱۱)$$

$$NB= GB-TC \quad (۱۲)$$

که در این رابطه GB ارزش ناخالص تولیدی بر حسب ریال در هکتار، Y عملکرد محصول برحسب کیلوگرم در هکتار، P قیمت هر کیلوگرم محصول بر حسب ریال، TC کل هزینه تولید برحسب ریال در هکتار و NB سود خالص تولیدی برحسب ریال در هکتار می‌باشد. بدین منظور کلیه هزینه‌های مربوط به تولید محصول شامل هزینه آماده‌سازی زمین (شخم، دیسک، بذرپاشی و غیره)، نهاده‌ها (کود، سم، بذر و غیره)، آب بهاء، عملیات آبیاری، نیروی انسانی، حمل و نقل، اجاره زمین، هزینه‌های مربوط به برداشت محصول و قیمت فروش هر محصول در هر هکتار تعیین و با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ سود خالص تعیین شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه بیش از ۸۰ درصد از مزارع در سطح دشت از روش آبیاری سطحی استفاده می‌کنند و عمدتاً هزینه‌های

---

۱- درجه جانشینی عبارت است از میزانی که از تحقق یک هدف برای دستیابی به هدف دیگر بایستی صرفنظر شود. در این مطالعه این جانشینی با تکیه بر وزن اهداف تعیین شده، مسافت بهینه‌سازی شده تا حد آرمانی برای هر هدف و مصالحه صورت گرفته بین آنها در فضای محدودیت‌های حاکم، صورت می‌گیرد. هر چه عامل تعادلی بزرگتر باشد تاثیری که تغییرات جانشینی بین اهداف بر جمع موزون مسافت آرمانی اهداف می‌گذارد بیشتر شده و بنابراین امکان جانشینی و مصالحه بین اهداف کمتر می‌گردد.

۲- منظور از ضرایب فنی در الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی عبارت از مقادیر واحد مورد استفاده از هر یک از نهاده‌ها (مقدار آب در واحد سطح، مقدار کود شیمیایی در واحد سطح، مقدار زمین اشغال شده در واحد زمان و غیره) مرتبط با مقیاس در نظر گرفته شده برای هر یک از آنها است.

این روش شامل آماده‌سازی زمین است در این تحقیق، صرفاً هزینه آب بهاء، و عملیات آبیاری در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین نیاز آبی و نیاز آبیاری محصولات مختلف در دشت مورد مطالعه از روش فائو پنمن مانتیث با استفاده از روابط زیر استفاده گردید (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o=\frac{0.408\,\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \qquad (۱۳)$$

که در این رابطه $ET_0$ تبخیر و تعرق پتانسیل (mm/day)، $R_n$ تابش خالص بر روی سطح گیاه ($MJ/m^2/day$)، T متوسط دمای روزانه در ارتفاع ۲ متری ($^0C$)، $u_2$ سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s)، $e_s$ فشار بخار اشباع (kPa)، $e_a$ فشار بخار واقعی (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($kPa/^0C$)، G چگالی شار حرارتی ($MJ/m^2/day$) و γ ثابت فیزیومتری ($kPa/^0C$) می‌باشد. پس از تعیین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس داده‌های هواشناسی بلندمدت منطقه، مقدار نیاز آبی هر گیاه (CWR) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$CWR=K_c\times ET_0 \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه CWR نیاز آبی گیاه (mm/day) و $K_c$ ضریب گیاهی می‌باشد. ضریب $K_c$ به نوع گیاه و مرحله رشد گیاه (مرحله اولیه، مرحله توسعه گیاه، مرحله میانی و مرحله پایانی) بستگی دارد و در این پژوهش از ضرایب گیاهی ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده شد (Allen *et al.*, 1998). به منظور تعیین نیاز آبیاری گیاه (IWR) بایستی مقدار بارش مؤثر ($P_e$) را تعیین نمود که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌گردد (USDA, 1967):

$$P_e=P_{tot}\frac{125-0.2P_{tot}}{125}\quad \text{for } P_{tot}<250\text{ mm} \qquad (۱۵)$$

$$P_e=125+0.1P_{tot}\quad \text{for } P_{tot}>250\text{ mm} \qquad (۱۶)$$

که در این رابطه $P_e$ بارش مؤثر (mm) و $P_{tot}$ بارش کل (mm) می‌باشد. بر این اساس به منظور محاسبه نیاز آبیاری از رابطه زیر استفاده شد:

$$IWR=CWR-P_e \qquad (۱۷)$$

در مورد شاخص امنیت غذایی نیز مقدار کالری تولید شده به ازای هر کیلوگرم از محصول مورد نظر در مقدار عملکرد آن محصول در هر هکتار ضرب شد و مقدار کالری کل تولید شده برای آن محصول محاسبه گردید. همچنین برای محاسبه شاخص انرژی مصرفی در تولید محصولات از رابطه کارآیی انرژی استفاده گردید. به منظور محاسبه انرژی ورودی و خروجی از هم ارز انرژی نهاده‌ها یا ستانده‌ها (جدول ۱) که در واقع بیان کننده میزان محتوای انرژی می‌باشد که در فرآیند تولید وارد یا خارج می‌شود، استفاده شد. به عنوان مثال هم ارز در نظر گرفته شده برای هر ساعت کار انسان برای شرایط کار در مزرعه ۱/۹۶ مگاژول می‌باشد که معادل با میزان انرژی مصرفی توسط آنها است.

**جدول ۱- ضرایب معادل انرژی نهاده‌ها در تولید محصولات کشاورزی**

**Table 1- Energy equivalent of inputs in the production of agricultural products**

| نهاده<br>Inputs | ضریب انرژی (مگاژول)<br>Equivalent Energy (MJ) | واحد<br>Unit |
|---|---|---|
| نیروی کار<br>Human Labour | 1.96 | ساعت<br>hr |
| ماشین‌آلات<br>Machinery | 62.7 | ساعت<br>hr |
| سوخت دیزل<br>Diesel Fuel | 47.8 | لیتر<br>L |
| الکتریسیته<br>Electricity | 12 | کیلووات ساعت<br>kwh |
| کود نیتروژن<br>Nitrogen Fertilizer | 78.1 | کیلوگرم<br>kg |
| کود فسفات<br>Phosphate Fertilizer | 17.4 | کیلوگرم<br>kg |
| کود پتاسیم<br>Potassium Fertilizer | 13.7 | کیلوگرم<br>kg |
| کود حیوانی<br>Manure | 0.3 | کیلوگرم<br>kg |
| سموم شیمیایی<br>Chemical pesticides | 210 | کیلوگرم<br>kg |
| آب آبیاری<br>Irrigation Water | 1.02 | مترمکعب<br>$m^3$ |
| بذر<br>Seed | 14.7 | کیلوگرم<br>kg |

جدول ۲- جریان انرژی ورودی و خروجی در هر هکتار گندم

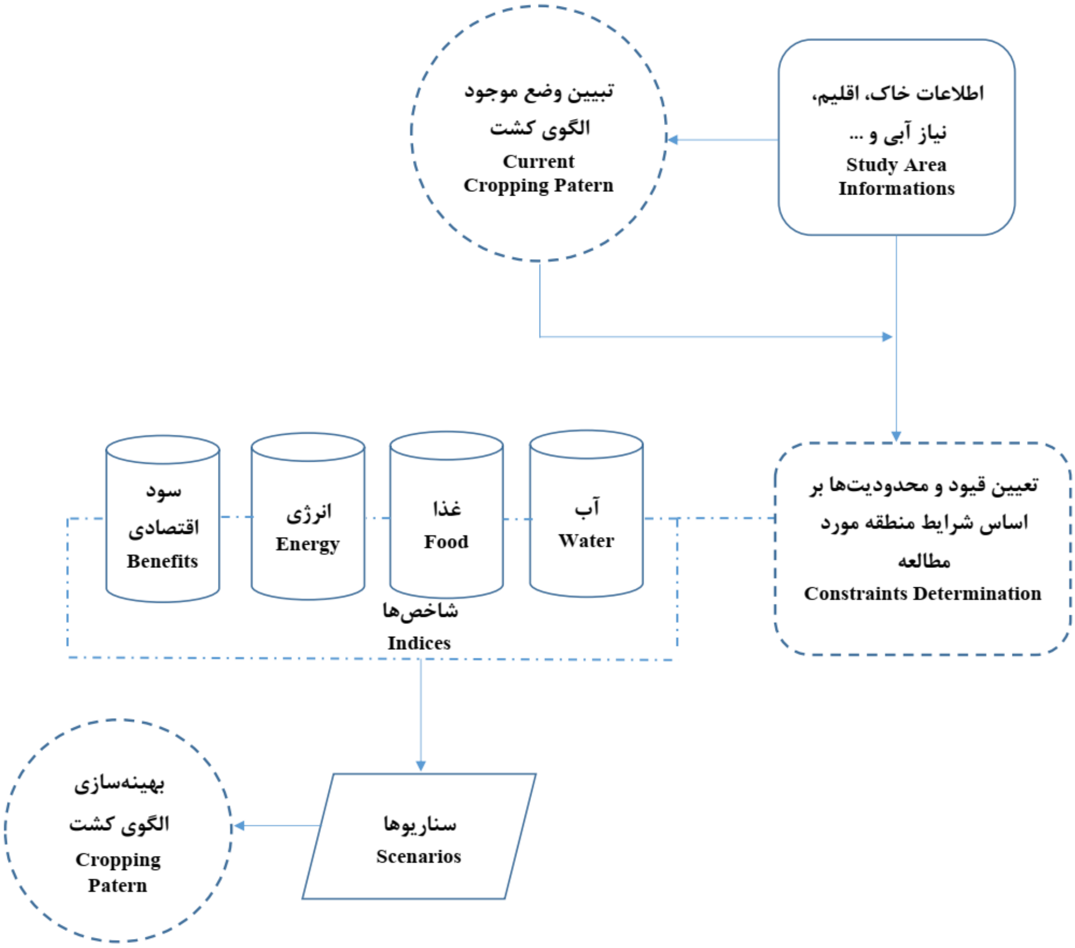
Table 2- Input and output energy flow per hectare for wheat

| نهاده‌ها Inputs | واحد Unit | مقدار متوسط در هکتار Average amount per hectare | ضریب انرژی (مگاژول) Equivalent Energy (MJ) | هم ارز انرژی کل Total Equivalent Energy (MJ) |
|---|---|---|---|---|
| آب آبیاری Irrigation Water | مترمکعب $m^3$ | 5378 | 1.02 | 5485 |
| کود ازت Nitrogen Fertilizer | کیلوگرم kg | 120 | 78.1 | 9372 |
| کود فسفات Phosphate Fertilizer | کیلوگرم kg | 50 | 17.4 | 870 |
| کود پتاس Potassium Fertilizer | کیلوگرم kg | 30 | 13.7 | 411 |
| سموم شیمیایی Chemical Pesticides | کیلوگرم kg | 3 | 210 | 630 |
| بذر Seed | کیلوگرم kg | 300 | 14.7 | 4410 |
| نیروی کار Human Labour | ساعت hr | 100 | 1.96 | 196 |
| سوخت دیزل Diesel Fuel | لیتر L | 266 | 47.8 | 12715 |
| ماشین‌آلات Machinery | ساعت hr | 130 | 62.7 | 8151 |
| الکتریسیته Electricity | کیلووات ساعت kwh | 1123 | 12 | 13476 |
| گندم Wheat | کیلوگرم kg | 4200 | 13 | 54600 |
| کاه Straw | کیلوگرم kg | 7250 | 12.5 | 90625 |
| مجموع انرژی ستانده‌ها Total Input Energy | مگاژول MJ | 56317 | | |
| مجموع انرژی خروجی Total Output Energy | مگاژول MJ | 145225 | | |
| کارآیی انرژی Energy Efficiency | | 2.58 | | |

هم ارز در نظر گرفته شده برای نهاده‌ها نیز از محاسبه میزان انرژی مصرف شده برای تولید هر واحد از آنها به دست می‌آید. به عنوان مثال هم ارز در نظر گرفته شده برای هر لیتر گازوئیل ۴۷/۸ مگاژول می‌باشد (Kitani, 1999 ؛ Zamani et al., 2014؛Heydari *et al.*, 2012). سپس کلیه پارامترهای مورد استفاده برای هر محصول در معادل انرژی مصرفی آن ضرب شده و بیلان انرژی ورودی و خروجی تعیین می‌گردد. در جدول ۲ نحوه انجام محاسبات جریان انرژی ورودی و خروجی در هر هکتار برای محصول گندم به عنوان نمونه ارائه شده است.

$$\text{کارآیی انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} \quad (۱۸)$$

به طور کلی، فرآیند بهینه‌سازی الگوی کشت در این مطالعه شامل جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز (اطلاعات هواشناسی، سطح زیر کشت، هزینه‌های کشت، و ...)، تبیین وضع موجود الگوی کشت براساس اطلاعات جمع‌آوری شده، تعیین قیود و محدودیت‌های بهینه‌سازی براساس شرایط منطقه مورد مطالعه، تعیین پارامترهای مربوط به اهداف چهارگانه بهینه‌سازی و نهایتاً بهینه‌سازی الگوی کشت برای سه سناریوی تعریف شده با استفاده از برنامه‌ریزی خطی چند هدفه در نرم‌افزارهای Lingo، MATLAB و EXCEL است. تحقق اهداف این مطالعه با توجه به حجم بالای اطلاعات ورودی و همچنین تعداد زیاد معادلات و متغیرها نیازمند انجام یک فرایند گسترده و پی در پی است که شمای کلی این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل توابع هدف تحت تأثیر قیود و محدودیت‌های مختلف شامل قیود فنی، اقتصادی، اجرایی و غیره، با توجه به شرایط منطقه قرار می‌گیرند. قیود مذکور بر اساس نتایج گام اول یعنی مطالعات اولیه تعیین می‌گردد.




**شکل ۲- شمای کلی فرآیند بهینه‌سازی الگوی کشت در سطح منطقه**

**Figure 2- Overview of the process of optimizing the cropping pattern at the region**

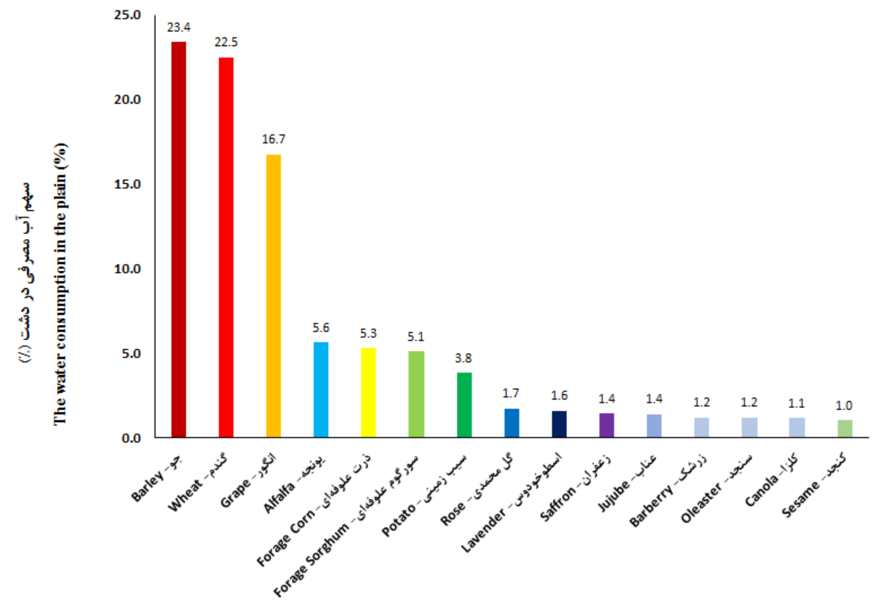
به منظور بهره‌برداری پایدار از منابع آب سناریوهای الگوی کشت در شرایط مختلف بهره‌برداری از منابع آب ارائه می‌گردد. بر این اساس، با توجه به شرایط حوضه از لحاظ پایداری منابع آب الگوی کشت بهینه برای شرایطی که بهره‌برداری از منابع آب در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی است ارائه می‌گردد و در هر دوره از یکی از این سه سناریو استفاده می‌گردد. بدین منظور ۳ سناریو زیر در نظر گرفته شده و الگوی کشت بهینه برای هر یک از این سناریوها ارائه شد:

- **سناریو اول:** در این سناریو که در شرایط نرمال آب و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افت سطح ایستابی سالیانه صفر در نظر گرفته می‌شود و محدودیت‌ها در برداشت از آبهای زیرزمینی بیشتر می‌شود. به گونه‌ای که کسری مخزن آبخوان که معادل ۲۶ میلیون مترمکعب است صفر شود.
- **سناریو دوم:** در این سناریو که در شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افت سطح ایستابی منفی در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر برداشت از منابع آب باید در حدی کاهش یابد که سطح آب زیرزمینی به اندازه ۲۵ درصد متوسط افت سطح ایستابی سالیانه کنونی دشت، افزایش یابد. در این حالت محدودیت‌های برداشت از منابع شدت بیشتری می‌گیرد تا خسارات ناشی از خشکسالی به حداقل ممکن کاهش یابد. در این حالت میزان برداشت از منابع آب بایستی حداقل به میزان ۳۲ میلیون متر مکعب کاهش یابد.
- **سناریو سوم:** در این سناریو که در شرایط ترسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افت سطح آب زیرزمینی به اندازه ۲۵ درصد متوسط افت سطح ایستابی سالیانه کنونی دشت و معادل ۲۵ درصد روند ثابت حاضر در نظر گرفته می‌شود و نسبت به دو سناریوی دیگر محدودیت کمتری برای برداشت آب در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر میزان برداشت از آبخوان بایستی به میزان ۲۰ میلیون متر مکعب کاهش یابد.

## نتایج و بحث

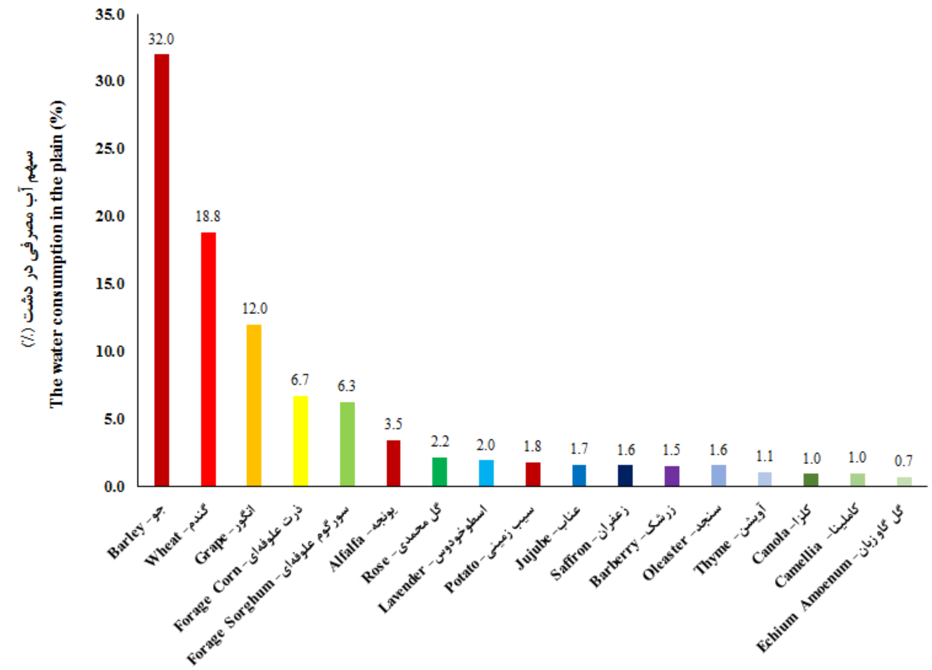
در جدول ۳ و ۴ خلاصه نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت برای سه سناریوی شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی با در نظر گرفتن چهار شاخص آب مصرفی، سود اقتصادی، انرژی مصرفی و کالری تولیدی ارائه شده است. نتایج حاصل نشان داد که با بهینه‌سازی الگوی کشت در هر سه سناریو به دلیل بهینه شدن سطح زیر کشت محصولات براساس شاخص‌های چهارگانه آب، انرژی، کالری و سود اقتصادی، مقادیر سود خالص و کالری تولیدی افزایش یافته و در مقابل آب مصرفی و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. بر این اساس، مقدار آب مصرفی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۲۳/۲، ۲۹/۲ و ۱۸/۱ درصد نسبت به الگوی کشت موجود کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار کالری تولیدی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۵۱/۷، ۶۱/۹ و ۴۵/۲ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. همچنین، متوسط بهره‌وری انرژی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۴۰/۹، ۴۲/۸ و ۳۵/۸ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. در نهایت، مقدار سود خالص تولیدی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۴۳/۳، ۳۰/۹ و ۴۴/۲ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. لذا، الگوی کشت بهینه پیشنهادی در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی از نظر چهار شاخص آب مصرفی، امنیت غذایی، سود اقتصادی و بهره‌وری انرژی گزینه مناسب و برتر می‌باشد.

در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ سهم آب آبیاری مورد نیاز محصولات تحت کشت در الگوی کشت بهینه دشت فراهان برای محصولات عمده ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در شرایط نرمال با توجه به سطح زیرکشت بهینه تعیین شده، محصول جو با نیاز خالص آبیاری ۱۰۳۰۸۰۷۰ متر مکعب در سطح دشت که معادل ۲۳/۴ درصد کل حجم آب مورد نیاز برای آبیاری در دشت است، بیشترین سهم را از کل آب مصرفی دشت به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن سه محصول گندم، انگور و یونجه به ترتیب با ۲۲/۵، ۱۶/۷ و ۵/۶ درصد بیشترین سهم مصرف آب را در بین محصولات کشت شده در دشت به خود اختصاص می‌دهند. در شرایط خشکسالی نیز با توجه به سطح زیرکشت بهینه تعیین شده، محصول جو با نیاز خالص آبیاری ۱۲۹۹۵۷۵۰ مترمکعب در سطح دشت که معادل ۳۲ درصد کل حجم آب مورد نیاز برای آبیاری در دشت است، بیشترین سهم را از کل آب مصرفی دشت به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن سه محصول گندم، انگور و ذرت علوفه‌ای به ترتیب با ۱۸/۸، ۱۲ و ۶/۷ درصد بیشترین سهم مصرف آب را در بین محصولات کشت شده در دشت به خود اختصاص می‌دهند. در شرایط ترسالی با توجه به سطح زیرکشت بهینه تعیین شده، محصول جو با نیاز خالص آبیاری ۱۰۶۰۰۹۰۰ متر مکعب در سطح دشت که معادل ۲۲/۵ درصد کل حجم آب مورد نیاز برای آبیاری در دشت است، بیشترین سهم را از کل آب مصرفی دشت به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن سه محصول گندم، انگور و یونجه به ترتیب با ۱۷/۸، ۱۵/۷ و ۹/۳ درصد بیشترین سهم مصرف آب را در بین محصولات کشت شده در دشت به خود اختصاص می‌دهند.



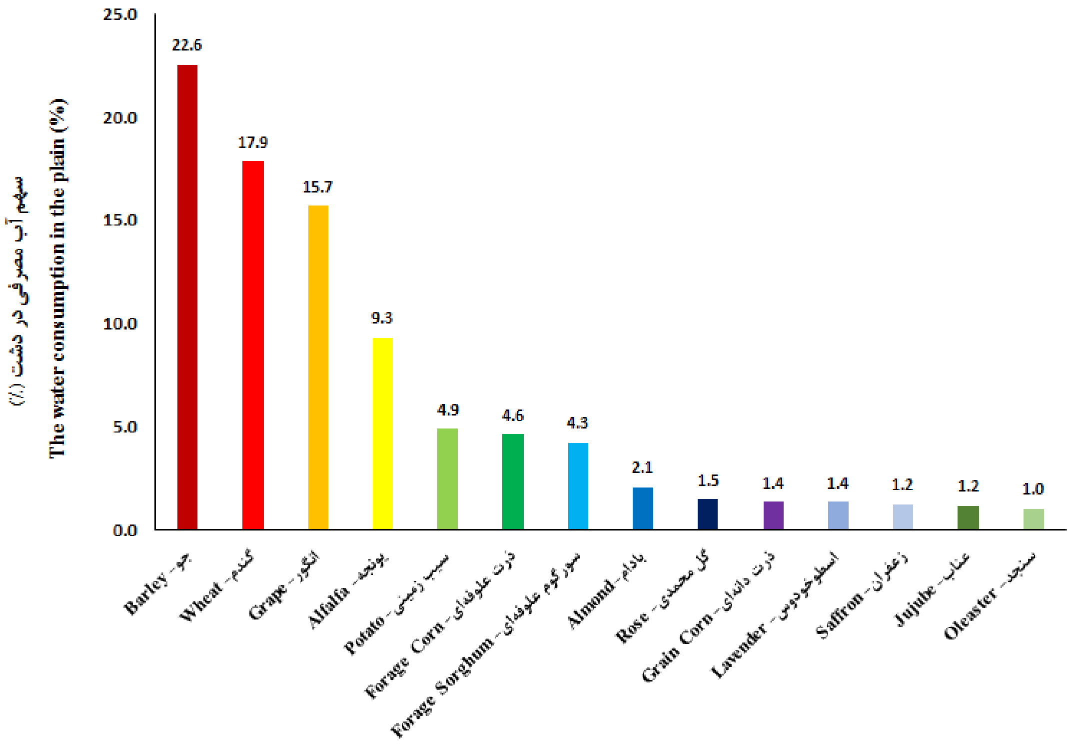

**شکل ۳- سهم مصرف آب محصولات کشت شده در دشت فراهان در الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال**

**Figure 3- The water consumption of cultivated crops in the Farahan Plain in the optimal cropping pattern under normal conditions**




**شکل ٤- سهم مصرف آب محصولات کشت شده در دشت فراهان در الگوی کشت بهینه در شرایط خشکسالی**

**Figure 4- The water consumption of cultivated crops in the Farahan Plain in the optimal cropping pattern under drought conditions**




**شکل ٥- سهم مصرف آب محصولات کشت شده در دشت فراهان در الگوی کشت بهینه در شرایط ترسالی**

**Figure 5- The water consumption of cultivated crops in the Farahan Plain in the optimal cropping pattern under wet conditions**

جدول ۳- توزیع محصولات الگوی کشت در وضعیت موجود و شرایط بهینه سناریوهای مدیریتی (هکتار)

Table 2- Distribution of crops in the current state and optimal conditions of management scenarios (hectares)

| محصول<br>Crop | سطح زیر کشت<br>در شرایط کنونی<br>Current Cultivated Area | سطح زیر کشت بهینه<br>در شرایط ترسالی<br>Wet Cultivated Area | سطح زیر کشت بهینه<br>در شرایط خشکسالی<br>Drought Cultivated Area | سطح زیر کشت بهینه<br>در شرایط نرمال<br>Normal Cultivated Area |
|---|---|---|---|---|
| یونجه<br>Alfalfa | 2207 | 515 | 165 | 291 |
| آفتابگردان<br>Sunflower | 10 | 20 | 0 | 0 |
| انگور<br>Grape | 745 | 1200 | 795 | 1200 |
| بادام<br>Almond | 485 | 150 | 0 | 0 |
| پیاز<br>Onion | 20 | 10 | 0 | 10 |
| جو<br>Baely | 4868 | 4670 | 5725 | 4541 |
| چغندرقند<br>Suger Beet | 20 | 20 | 0 | 50 |
| ذرت دانه‌ای<br>Corn | 10 | 110 | 0 | 40 |
| ذرت علوفه‌ای<br>Forage Corn | 209 | 420 | 530 | 450 |
| سیب‌زمینی<br>Potato | 455 | 315 | 100 | 230 |
| عدس<br>Lentils | 1 | 50 | 70 | 74 |
| گندم<br>Wheat | 3000 | 2836 | 2585 | 3353 |
| لوبیا<br>Bean | 359 | 75 | 0 | 20 |
| هندوانه<br>Watermelon | 100 | 50 | 0 | 20 |
| نخود<br>Pea | 37 | 95 | 10 | 12 |
| گلرنگ<br>Safflower | 10 | 65 | 85 | 50 |
| کلزا<br>Canola | 46 | 120 | 140 | 180 |
| گوجه<br>Tomato | 2 | 10 | 0 | 0 |
| کنجد<br>Sesame | 5 | 98 | 20 | 103 |

بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که در الگوی کشت بهینه در شرایط خشکسالی سطح زیر کشت محصولاتی مانند سیب‌زمینی، پیاز، گوجه، ذرت دانه‌ای، چغندرقند، لوبیا، یونجه و هندوانه بایستی به صفر و یا حداقل برسد و در شرایط نرمال و ترسالی نیز سطح زیر کشت این محصولات حداقل باشد. در مقابل سطح زیرکشت محصولاتی مانند سورگوم علوفه‌ای، ذرت علوفه‌ای، زعفران، زیره، کاملینا و گیاهان دارویی افزایش یابد و کشت این محصولات در سطح منطقه ترویج گردد. همچنین در خصوص محصولات باغی بایستی سطح زیر کشت باغات گردو، سیب، هلو، زردآلو و بادام به حداقل رسیده و با محصولاتی مانند انگور، سنجد، عناب، زرشک، گل محمدی و انجیر جایگزین گردند. براساس نتایج به دست آمده، در جدول ۵ لیست محصولات جایگزین پیشنهادی در گروه‌های مختلف زراعی و باغی در دشت فراهان براساس الگوی کشت بهینه پیشنهادی ارائه شده است.

ادامه جدول ۳- توزیع محصولات الگوی کشت در وضعیت موجود و شرایط بهینه سناریوهای مدیریتی (هکتار)

**Table 2 Continued - Distribution of crops in the current state and optimal conditions of management scenarios (hectares)**

| محصول<br>Crop | سطح زیر کشت در شرایط کنونی<br>Current Cultivated Area | سطح زیر کشت بهینه در شرایط ترسالی<br>Wet Cultivated Area | سطح زیر کشت بهینه در شرایط خشکسالی<br>Drought Cultivated Area | سطح زیر کشت بهینه در شرایط نرمال<br>Normal Cultivated Area |
|---|---|---|---|---|
| ارزن<br>Millet | 5 | 30 | 20 | 10 |
| زعفران<br>Saffron | 14 | 300 | 335 | 320 |
| گل محمدی<br>Rose | 7.5 | 235 | 300 | 250 |
| زرشک<br>Barberry | 0 | 125 | 178 | 150 |
| زیره<br>Cumin | 0 | 100 | 130 | 120 |
| عناب<br>Jujube | 0 | 135 | 165 | 150 |
| سنجد<br>Oleaster | 75 | 140 | 185 | 150 |
| انجیر<br>Fig | 0 | 70 | 70 | 70 |
| سیب<br>Apple | 49 | 10 | 0 | 0 |
| هلو<br>Peach | 48 | 10 | 0 | 0 |
| زردآلو<br>Apriot | 45 | 40 | 0 | 0 |
| گردو<br>Walnut | 243 | 0 | 0 | 0 |
| سورگوم علوفه‌ای<br>Forage Sorghum | 1 | 465 | 595 | 520 |
| کاملینا<br>Camelina | 1 | 30 | 205 | 185 |
| گل‌گاوزبان<br>Echium | 1 | 90 | 85 | 100 |
| بابونه<br>Chamomile | 1 | 95 | 105 | 50 |
| اسطوخودوس<br>Lavender | 1 | 200 | 250 | 220 |
| آویشن<br>Thyme | 1 | 100 | 130 | 110 |
| زوفا<br>Hyssop | 1 | 70 | 96 | 80 |

نتایج این تحقیق نشان داد که سناریوهای پیشنهادی با کاهش مصرف آب موجب تعدیل افت سطح ایستابی آبهای زیرزمینی در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی شده و در عین حال در راستای رسیدن به کشاورزی پایدار می‌باشد. به عبارت دیگر ضمن کاهش مصرف آب میزان کالری تولیدی، بهروری انرژی و سود اقتصادی نیز افزایش می‌یابد که با نتایج سایر تحقیقات انجام شده در این خصوص شامل عوض‌یار و همکاران (Avazyar *et al.*, 2018)، مفتاح هلقی و همکاران (Meftah Halaghi *et al.*, 2020)، عارفی‌نیا و احمدآلی (Arefinia and Ahmadaali, 2021)، پناهی و فلسفیان (Panahi and Falsafian, 2021)، هوشمند و همکاران (Hooshmand *et al.*, 2021)، صالحی شفا و همکاران (Salehi Shafa *et al.*, 2022)، همخوانی داشته و یافته‌های این تحقیق را تائید می‌نماید.

جدول ٤- مقادیر آب مصرفی، کالری تولیدی، بهره‌وری انرژی و سود خالص تولیدی در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی الگوی کشت

**Table 3- Amounts of water, calories, energy efficiency and net profit in different scenarios of cropping pattern optimization**

| سناریو<br>SCENARIO | سود خالص تولیدی<br>Net Benefit (Toman) | بهره‌وری انرژی<br>Energy Efficiency | کالری تولیدی<br>Produced Calories (C) | آب مصرفی<br>Water Consumption ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| الگوی کشت کنونی<br>Current Cropping Pattern | $1.07626\times10^{11}$ | 2.37 | $2.18694\times10^{11}$ | 114.8 |
| الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال<br>Normal Cropping Pattern | $1.54283\times10^{11}$ | 3.34 | $3.31824\times10^{11}$ | 88.1 |
| الگوی کشت بهینه در شرایط خشکسالی<br>Drought Cropping Pattern | $1.40955\times10^{11}$ | 3.39 | $3.54099\times10^{11}$ | 81.3 |
| الگوی کشت بهینه در شرایط ترسالی<br>Wet Cropping Pattern | $1.55216\times10^{11}$ | 3.22 | $3.17577\times10^{11}$ | 94 |

جدول ۵- محصولات جایگزین پیشنهادی در دشت فراهان براساس الگوی کشت بهینه پیشنهادی

**Table 4- Suggested alternative crops in Farahan Plain based on the proposed optimal cropping pattern**

| محصول در شرایط موجود<br>Current Cultivated Crops | محصول جایگزین<br>Alternative Crops |
|---|---|
| حبوبات (انواع لوبیا)<br>Legumes (Beans) | عدس، نخود<br>lentils, chickpeas |
| علوفه (یونجه)<br>Forage (Alfalfa) | سورگوم علوفه‌ای، ذرت علوفه‌ای، جو، کاملینا، ارزن<br>Fodder Sorghum, Fodder Corn, Barley, Camellia, Millet |
| غلات (گندم، ذرت)<br>Cereals (Wheat, Corn) | جو، ارزن، کنجد، کاملینا، کلزا، گلرنگ<br>Barley, Millet, Sesame, Camelina, Canola, Safflower |
| محصولات باغی<br>Horticultural Products | انگور، سنجد، عناب، زرشک، گل محمدی، گیاهان دارویی<br>Grapes, Oleaster, Jujube, Barberry, Rose, Medicinal Plants |
| سبزی و صیفی (هندوانه، پیاز، سیب‌زمینی، گوجه)<br>Vegetables and Summer Crops | کشت گلخانه‌ای<br>Greenhouse Cultivation |

## نتیجه‌گیری

به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که در دشت فراهان کشاورزی پایدار انجام نمی‌شود، الگوی کشت موجود الگوی بهینه نمی‌باشد و کشاورزان به صورت بهینه از منابع آب و خاک و سایر نهاده‌های کشاورزی استفاده نمی‌کنند. این مسئله باعث شده که ضمن بهره‌برداری ناپایدار از منابع و به خطر افتادن این منابع در دشت، کشاورزان سود مناسبی نیز بدست نمی‌آورند و در راستای تأمین امنیت غذایی نیز گام برنمی‌دارند. از این رو، یکی از مهمترین اقدامات برای رسیدن به کشاورزی پایدار در این دشت اصلاح الگوی کشت و بهینه‌سازی آن بر اساس شاخص‌های آب مصرفی، امنیت غذایی، انرژی مصرفی و سود اقتصادی می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که استفاده از الگوی کشت بهینه حاصل از شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی بر الگوی کشت موجود و الگوی کشت تک هدفه کاملاً برتری داشته و دارای ارجحیت است. همچنین، به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب بایستی الگوی کشت در دوره‌های خشکسالی، نرمال و ترسالی مطابق الگوی بهینه پیشنهادی تغییر یابد. بنابراین، با توجه به اینکه الگوی کشت موجود کمترین میزان اهداف چهارگانه آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی را تأمین می‌کند، برنامه‌ریزی‌های کلان در این دشت بایستی در راستای اجرای الگوی کشت بهینه پیشنهادی تدوین گردد و تمام امکانات و ابزارهای حمایتی دولت در جهت اجرای الگوی کشت بهینه به کار گرفته شوند.

## منابع


1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration*. Guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
2. Arefinia, A., & Ahmadaali, K. (2021). Multi-objective optimization of cropping pattern by emphasizing on water footprint in the eastern provinces of Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(1), 188-198. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.16.6
3. Avazyar, M., & Ahmadpour Borazjani, M., & Ziaee, S. (2018). Determine optimal crop pattern with an emphasis on increasing the irrigation efficiency in lands of Mollasadra Dam in Fars province. *Water Engineering*, *11*(36), 21-32. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1397.11.36.3.4
4. Azari, M., Ansari, H., Farid Hosseni, A., & Amirnejad, H. (2012). *Determining the pattern of optimal crop*

*production using linear programming, a case study in the east of Mazandaran province*. The first national conference on sustainable agriculture and natural resources, Tehran. (In Persian)

5. El Gafy, I., Grigg, N., & Reagan, W. (2017). Water-food-energy nexus index to maximize the economic water and energy productivity in an optimal cropping pattern. *Water International*, *42*(4), 495-503. https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1309630
6. Goodarzi, M. (2022). Prioritization of Arable Crops Using Multiple Criteria and Analytical Hierarchy Process (AHP) Method, Case Study: Markazi Province - Farahan Plain. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *16*(3), 485-498. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.3.3.4
7. Hasan Panah, D., Nikshad, Kh., Sui, A., & Karbalai Khayavi, H. (2014). *Program for optimizing the cultivation pattern of crops and garden crops in Ardabil province*. Technical Report, No. 38, Agricultural Research, Education and Extention Organization. (In Persian)
8. Heydari, M.D., Omid, M., Akram, A., Mebli, H., & Rajaeifar, M.A. (2012). Energy consumption in agricultural and livestock products of Iran: a review study. 8th National Congress of Agricultural Machine Engineering (Biosystem) and Mechanization of Iran, Mashhad. (In Persian)
9. Hooshmand, A., Mohammadzadeh, H., Kanooni, A., & Haghighi, A. (2021). Optimization of cultivation pattern based on risk management in the downstream irrigation network of Ardabil Yamchi Dam. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(4), 918-930. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.2021.15.4.15.5
10. Jones, D., & Barnes, E.M. (2000). Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. *Journal of Agricultural System*, 65, 137-158. https://doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00026-3
11. Kitani, O. (1999). *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Volume V Energy and Biomass Engineering, Chapter 1 Natural Energy and Biomass, Part 1.3 Biomass Resources.
12. Meftah Halaghi, M., Ghorbani, K., Keramatzadeh, A., & Salarijazi, M. (2020). Crop pattern optimization by using Goal programming (case study: Gharesoo basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, *27*(1), 163-180. (In Persian with English abstract) https://dx.doi.org/10.22069/jwsc.2020.16875.3223
13. Mohammadi, H., Boustani, F., & Kafilzadeh, F. (2012). Optimal cropping pattern using a multi-objectives fuzzy non-linear optimization algorithm: A case study. *Water and Wastewater*, *23*(4), 43-55. (In Persian with English abstract)
14. Mohammadian, F., Alizadeh, A., Neyrizi, S., & Arabi, A. (2008). Development of a sustainable cropping pattern based on virtual water trade. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *2*(1), 109-126. (In Persian with English abstract)
15. Nikoi, A. (2014). *Developing the national cropping pattern plan in pilot stage: Dasht village, Shahreza city, Esfahan Province.* Final Report. Agricultural Research, Education and Exiension Organization. (In Persian)
16. Panahi, A., & Falsafian, A. (2021). Optimization of the crop cultivation in the Shabestar plain under water constraint. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *10*(4), 36-48. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.30495/wsrcj.2021.18079
17. Poursamani, S. (2018). *Determining the optimal pattern of crop cultivation using the ideal planning method with an emphasis on the economic efficiency of water consumption and sustainable agriculture (case study: Torbat Jam plain)*. Master's thesis in the field of agricultural economics, Birjand University. (In Persian)
18. Regulwar, D.G., & Gurav, J.B. (2013). Two-phase multi objective fuzzy linear programming approach for sustainable irrigation planning. *Journal of Water Resource and Protection*, *5*(6), 642-651. http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.56065
19. Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. Mcgraw-Hill, New York. http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I
20. Salehi Shafa, N., Babazadeh, H., Aghayari, F., & Saremi, A. (2022). Determining the optimal cultivation area and pattern of agricultural water consumption in order to manage multi-objective planning. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *16*(1), 119-133. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.1.10.7
21. Siasar, H., & salari, A. (2021). Optimization of Sistan plain cropping pattern using multi-objective chaotic particle swarm optimization Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15*(5), 1006-1017. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.5.2.0
22. USDA. (1967). *Irrigation water requirements*. Tech. Release No. 21, United States Dept. of Agr., Soil Manage, 59, 67–75.
23. Zamani, O., Ghaderzadeh, H., & Mortazavi, Sa. (2014). Cropping pattern system respect to sustainable agriculture and optimum use of energy "A case of Saqez County of Kurdistan Province". *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *24*(1), 31-43.
24. Zeng, X., Kang, S., Li, F., Zhang, L., & Guo, P. (2010). Fuzzy multi-objective linear programming applying to crop area planning. *Agricultural Water Management*, *98*(1), 134-142. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.010